

OPTIMASI KETEBALAN INSULATOR PADA JARINGAN PIPA GEOTHERMAL

Isnani, M.Si

PMTK FKIP Universitas Pancasakti
Jl. Halmahera km 01 Tegal
isna201@yahoo.com

Abstracts. Geothermal is one of cheap and huge energy resources in Indonesia. Geothermal power supply generated by thermal steam, where is transmitted through geothermal pipe line was usually built near a geothermal source. To minimize heat losses pipe surface is patched by insulator. Furthermore to decide insulator thickness for optimum result, the mathematical model is applied. The insulator optimum thickness (5,733575488) is obtained the cost needed is \$1488,373278

Keywords: Geothermal, heat losses, insulator thickness, cost

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Fluida panas bumi bertemperatur tinggi ($>225^{\circ}\text{C}$) telah lama digunakan di beberapa negara untuk pembangkit tenaga listrik, namun beberapa tahun terakhir perkembangan teknologi telah memungkinkan digunakannya fluida bertemperatur sedang ($150-225^{\circ}\text{C}$) untuk pembangkit listrik.

Selain temperatur, faktor-faktor lain yang biasanya dipertimbangkan dalam memutuskan apakah suatu sumber daya panas bumi tepat untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik adalah sebagai berikut [3].

- Sumber daya mempunyai kandungan panas atau cadangan yang besar sehingga mampu memproduksi uap untuk jangka waktu sekitar 25-30 tahun.
- Sumber daya panas memproduksi fluida yang mempunyai pH hampir netral agar laju korosinya relatif rendah, sehingga fasilitas produksi tidak cepat terkorosi. Selain itu kecenderungan fluida membentuk scale relatif rendah.
- Reservoirnya tidak terlalu dalam, biasanya tidak lebih dari 3 km dan terdapat di daerah yang relatif tidak sulit dicapai.

- Terletak di daerah dengan kemungkinan terjadinya erupsi hidrothermal relatif rendah.

Panas Bumi sebagai salah satu sumber energi yang murah terbesar di banyak wilayah di Indonesia, hal ini disebabkan wilayah Indonesia berada di sekitar bertemunya lempengan-lempengan bumi yang saling bertumbukan. Fluida panas bumi umumnya dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik yang digunakan untuk memutar generator pada turbin (PLTP).

Persoalan aliran multifasa dalam pipa adalah memperkirakan besarnya kehilangan tekanan yang terjadi selama aliran. Perhitungan kehilangan tekanan dalam pipa ini sangat diperlukan karena yang dimanfaatkan dari fluida panas bumi adalah energi yang dibawa yang berupa daya dorong tekanan tinggi akibat dari suhu yang tinggi sehingga diusahakan supaya kehilangan tekanan yang terjadi sekecil mungkin.

1.2. Perumusan Masalah

Dalam perencanaan pipa alir uap di lapangan panas bumi perlu dilakukan dengan baik agar tidak terjadi kehilangan panas yang berlebihan. Untuk mengurangi kehilangan panas, permukaan luar pipa dilapisi dengan insulator. Makin tebal insu-

lator, kehilangan panas makin kecil, tetapi akan menambah biaya sesuai dengan makin banyaknya bahan insulator yang diperlukan. Namun masalahnya adalah bagaimana menentukan ketebalan insulator yang memberikan hasil yang optimum.

1.3. Batasan Masalah

Untuk mempermudah penyelesaian masalah, akan digunakan beberapa asumsi. Adapun beberapa asumsi yang digunakan pada tulisan ini adalah sebagai berikut.

1. Selama fluida mengalir dalam pipa dianggap selalu dalam keadaan satu-rasi,
2. Fluida dianggap air murni sehingga sifat-sifat termodinamika fluida dianggap mengikuti sifat-sifat air murni,
3. Dianggap tidak terjadi scaling dalam pipa sehingga kekasaran pipa dan diameter dalam pipa tidak terjadi perubahan,
4. Ukuran pipa telah ditetapkan dan tidak mengalami perubahan akibat pemuaian,
5. Aliran fluida steady-state,
6. Pipa berbentuk horisontal,
7. Penggunaan insulator dalam satu pipa dianggap sama.

1.4. Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan pemodelan matematika "*Optimasi Ketebalan Insulator pada Jaringan Pipa Geothermal*" adalah

1. Membuat model matematika perubahan tekanan dan heat losses terhadap panjang pipa,
2. Membuat model matematika biaya,
3. Membuat simulasi tekanan terhadap panjang pipa dan hubungannya dengan

heat losses,

4. Membuat simulasi ketebalan insulator dengan biaya sehingga biaya minimal.

2. MODEL MATEMATIKA

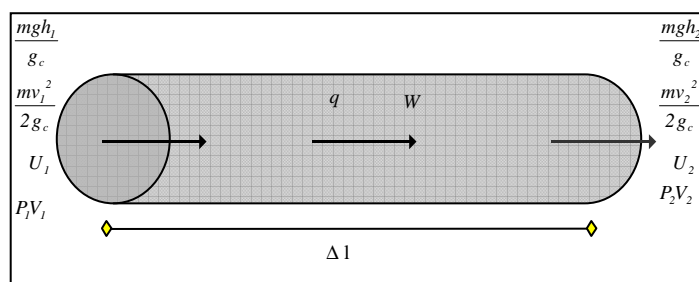
Untuk mencapai tujuan utama penulisan yang diharapkan, ada beberapa hal yang harus diketahui dan dipahami yaitu berkenaan dengan model aliran fluida, model *heat losses*, dan model biaya. Hal tersebut dikarenakan keterkaitan dengan tebal insulator yang akan dioptimalkan. Berikut ini akan dibahas mengenai model-model yang diperlukan tersebut.

2.1. Model Aliran Fluida

Fluida yang keluar dari sumur panas bumi akan dialirkan dalam pipa menuju turbin yang digunakan untuk Pembangkit listrik tenaga Panas-bumi (PLTP). Selama fluida mengalir dalam pipa mengalami perubahan tekanan, dalam tulisan ini diharapkan perubahan tekanan yang terjadi sesuai dengan yang diinginkan.

Aliran fluida dalam pipa mengikuti persamaan energi yang menyatakan keseimbangan energi antara dua titik dalam sistem aliran fluida. Persamaan ini mengikuti hukum konservasi energi bahwa energi yang masuk dengan kerja yang dilakukan fluida sama dengan energi yang keluar [1]. Sehingga dapat dilustrasikan pada Gambar 1, dimana energi yang masuk meliputi

1. Energi dalam (U) berupa energi rotasi, translasi, dan vibrasi molekul-molekul fluida. Harga energi dalam adalah relatif dan pada kondisi tertentu harganya nol.



Gambar 1. Sistem aliran fluida

2. Energi kinetik $\left(\frac{mv^2}{2g_c}\right)$ berupa kecepatan fluida.
3. Energi potensial $\left(\frac{mgh}{g_c}\right)$ yaitu energi yang disebabkan ketinggian dua titik.
4. Pressure volume (PV) disebut juga sebagai energi tekanan.
5. Energi panas (q) yaitu energi yang masuk atau keluar dari sistem.
6. Kerja (W).

Sedangkan yang keluar yaitu energi dalam, energi kinetik, energi potensial dan pressure volume. Dari uraian di atas dapat dituliskan sebagai persamaan berikut.

$$U_1 + \frac{mv_1^2}{2g_c} + \frac{mgh_1}{g_c} + P_1V_1 + q - W = U_2 + \frac{mv_2^2}{2g_c} + \frac{mgh_2}{g_c} + P_2V_2. \quad (2.1)$$

Berdasarkan batasan masalah bahwa pipa yang dipakai horisontal maka diperoleh energi potensialnya nol dan dengan menggunakan konsep-konsep termodinamika maka persamaan (2.1) menjadi persamaan aliran uap pada jaringan pipa geothermal [1], yang digambarkan oleh persamaan berikut.

$$\frac{dP}{dL} = \frac{\left(\frac{dP}{dL}\right)_{ges}}{1 - Ek} = \frac{\frac{f_M \rho_n v_m^2}{2g_c d}}{1 - \left(\frac{\rho_n v_m v_{sg}}{g_c P}\right)}, \quad (2.2)$$

dengan

$$f_M = \frac{1}{\left(1,14 - 2 \ln \left(\frac{\varepsilon}{d} + \frac{21,25}{N_{Re}^{0,9}} \right) \right)^2},$$

dan

$$N_{Re} = \frac{\rho_n v_m d}{\mu}.$$

Pada persamaan (2.2) merupakan persamaan gradient tekanan total dan ada persamaan gradien tekanan karena gesekan, harga factor gesekan dipengaruhi oleh kekerasan relative pipa dan dipengaruhi oleh sifat aliran fluida yang dinya-

takan dengan bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds adalah bilangan tak berdimensi yang besarnya dapat dihitung. Pada persamaan gradient tekanan karena gesekan dituntut untuk menentukan diameter yang ideal karena jika diameternya terlalu kecil maka terjadi gesekan yang besar antar partikel, sehingga akan terjadi pressure drop (*heat loss*) yang cukup besar tetapi jika diameter terlalu besar maka biaya investasi pipa akan tinggi.

2.2. Model Heat Losses

Untuk menghindarkan kehilangan panas yang berlebihan, pipa alir uap harus selalu diinsulasi. Material yang digunakan sebagai bahan insulasi sangat beragam baik bentuk, ukuran, ketebalan dan jenis materialnya. Material yang banyak tersedia adalah:

- Mineral fibrous atau cellular: Alumina, asbestos, glass, perlite, rock, silica
- Organik fibrous atau cellular: Cane, cotton, wood, cork
- Cellular organik plastics: elastomer, polystyrene
- Cements: insulating and/or finishing
- Heat-reflecting metals: Aluminium, nickel, stainless steel.

Bentuknya bisa berupa lembaran, block, cement, loose fill foil. Ketebalan dan konduktivitasnya juga beragam, tergantung jenis material.

Material yang digunakan untuk menginsulasi pipa perlu dilindungi lagi dengan material lain di luarnya (*cladding*) untuk melindungi insulator dari masuknya air, kerusakan secara mekanis, degradasi ultra violet. *Cladding* dapat berupa cat, asphaltic, resinous (polymeric), atau material lain seperti seperti plastic, metal. Metal *claddings* harus lebih tahan, tidak memerlukan banyak perawatan dan dapat mengurangi panas yang hilang.

Pemilihan jenis material untuk insulasi dan *cladding* tergantung dari banyak faktor. Untuk sistem temperatur sedang sampai tinggi biasanya digunakan cellular atau fibrous materials. Di lapangan Ohaaki pipa diinsulasi dengan fibre-

glass atau calsium silicate dengan ketebalan 65 mm dan luarnya diselubungi lagi dengan aluminium atau Fibreglass Reinforced Plastic (FRP) untuk fitting dan valves. Di lapangan Tiwi (Phillipine) pipa mulanya diinsulasi dengan calsium silicate dan kemudian dilindungi dengan aluminium cladding tapi kemudian diganti dengan FRP, karena aluminium dicuri dan dijual, tapi FRP pun sering dicuri karena merupakan material yang baik untuk atap rumah. Calsium silicate kemudian juga diganti dengan Perlite-Permacrete yang tidak mudah dibongkar. Pengerjaannya memerlukan banyak tenaga kerja sehingga tidak tepat bila digunakan di negara-negara yang upah tenaga kerjanya tinggi.

Heat losses atau kehilangan panas merupakan suatu fenomena yang pasti terjadi dalam aliran geothermal dalam pipa. Tetapi hal ini diminimalisasi dengan penambahan insulator yang melapisi pipa alir tersebut. Ketebalan insulator tergantung pada seberapa banyak heat losses yang terjadi dan jenis pipa itu sendiri. Model Heat Losses ditentukan berdasarkan perpindahan panas dalam pipa ke dinding pipa dan perpindahan panas dari dinding pipa ke udara luar [3]. Model heat losses digambarkan oleh persamaan berikut ini.

$$Q = \frac{k_1 \cdot (T_i - T_w) \cdot \Delta L}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} - h_o \cdot 2\pi r_3 (T_w - T_a) \cdot \Delta L. \quad (2.3)$$

Persamaan (2.3) diperoleh dari

$Q = Q_1 - Q_2$ dengan

$$Q_1 = \frac{k_1 \cdot (T_i - T_w) \cdot \Delta L}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \text{ dan}$$

$$Q_2 = h_o \cdot 2\pi r_3 (T_w - T_a) \cdot \Delta L.$$

2.3. Model Biaya

Untuk menentukan tebalnya insulator, digunakan cara meminimuman biaya yang dikeluarkan. Biaya yang dikeluarkan itu meliputi beberapa parameter [2], antara lain:

1. Biaya tetap, yaitu biaya pipa.
2. Biaya tidak tetap, yaitu biaya insulator, aluminium dan heat losses (yang dipengaruhi oleh besarnya h_{ins}).

➤ Biaya Pipa

Biaya pipa ditentukan berdasarkan berat total pipa tersebut, dan digambarkan dalam persamaan berikut.

$$\text{Biaya pipa} = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) \cdot L \cdot \rho_{\text{besi}} \cdot C_{\text{pipa}}.$$

➤ Biaya insulator

Biaya insulator ditentukan berdasarkan volume insulator tersebut, dan digambarkan dalam persamaan berikut.

Biaya insulator

$$\begin{aligned} &= \frac{\pi}{4} (d_3^2 - d_2^2) \cdot L \cdot C_{\text{ins}} \\ &= \frac{\pi}{4} ((d_2 + 2h_{\text{ins}})^2 - d_2^2) \cdot L \cdot C_{\text{ins}}. \end{aligned}$$

➤ Biaya Aluminium

Biaya aluminium ditentukan berdasarkan luas permukaan pipa yang telah dilapisi insulator, dan digambarkan dalam persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \text{Biaya aluminium} &= \pi \cdot d_3 \cdot L \cdot C_{\text{alm}} \\ &= \pi (d_2 + 2h_{\text{ins}}) \cdot L \cdot C_{\text{alm}}. \end{aligned}$$

➤ Biaya Heat Losses

Biaya heat losses ditentukan berdasarkan heat losses yang terjadi pada pipa, dan digambarkan dalam persamaan berikut.

Biaya Heat Losses

$$= 365 \cdot 24 \cdot Q \cdot C_{\text{steam}} \cdot 10^{-3}$$

Sehingga model biaya yang dikeluarkan pada tahun ke-n dapat ditulis dalam persamaan berikut.

$$\begin{aligned} C_t &= [\text{Biaya Investasi}]_{\text{annual}} \\ &\quad + [\text{Biaya Heat Losses}], \end{aligned}$$

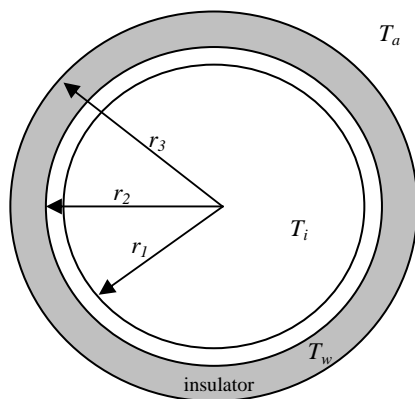
dimana

$[\text{Biaya Investasi}]_{\text{annual}}$

$$= \left(\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right) [\text{Biaya Investasi}],$$

r : suku bunga per tahun

Biaya Investasi = [Biaya pipa]
+ [Biaya insulator] + [Biaya alumunium].



Gambar 2. Penampang Pipa Alir

3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN MASALAH

Setelah diperkenalkan beberapa model penting yang digunakan, maka pada bab ini akan dibahas analisis dari model-model tersebut, serta pembahasan masalah utama pada tulisan ini yang berkenaan dengan tebal optimum insulator.

3.1. Analisis Perubahan Tekanan terhadap Panjang Pipa

Tabel 1 berikut ini memperlihatkan perbandingan perubahan tekanan terhadap panjang pipa dengan dan tanpa diberikan insulator. Dalam simulasi ini dapat

dilihat bahwa terjadi penurunan tekanan ketika semakin panjangnya pipa dengan penambahan insulator maupun tanpa insulator. Sehingga dapat dikatakan bahwa perubahan tekanan berbanding terbalik terhadap panjang pipa. Bentuk simulasinya yang dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3 menyerupai berupa garis lurus yang bergradien negatif. Namun yang cukup menarik adalah berpengaruhnya insulator dalam skala kecil dalam mengurangi penurunan tekanan. Simulasi ini dibuat dengan menggunakan matlab dan metode perhitungan Rungke-Kutta, dengan program matlab dengan hasil sebagai berikut.

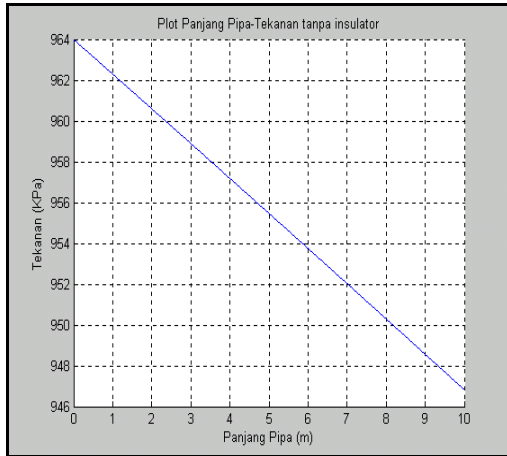
3.2. Analisis Heat Losses terhadap Panjang Pipa

Tabel 2 berikut ini memperlihatkan perbandingan perubahan heat losses terhadap panjang pipa dengan dan tanpa diberikan insulator. Dalam simulasi ini dapat dilihat bahwa terjadi penurunan heat losses ketika semakin panjangnya pipa dengan insulator maupun tanpa insulator.

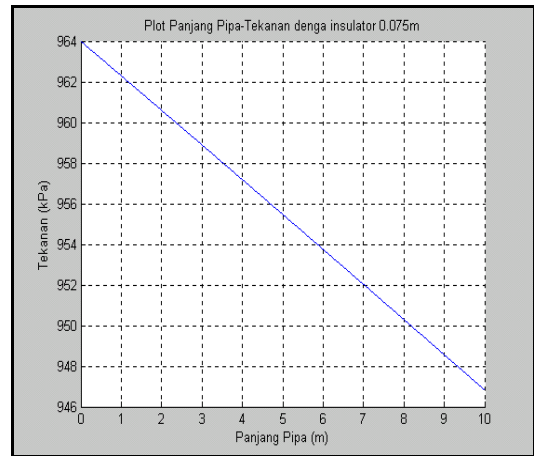
Hal ini disebabkan terjadinya penurunan tekanan seperti yang sudah dibahas sebelumnya yang berpengaruh terhadap perubahan suhu di dalam pipa.

Tabel 1. Perbandingan Perhitungan Tekanan

No.	Panjang Pipa (m)	Tekanan (Kpa)	
		Tanpa insulator	insulator 0.075 m
1	Inlet	964.0000	964.0000
2	1	962.3057	962.3056
3	2	960.6235	960.6065
4	3	958.9025	958.9024
5	4	957.1936	957.1934
6	5	955.4798	955.4795
7	6	953.7610	953.7606
8	7	952.0372	952.0367
9	8	950.3257	950.3078
10	9	948.5745	948.5737
11	10	946.8355	946.8345



Gambar 3. Plot Panjang Pipa -Tekanan tanpa insulator



Gambar 4. Plot Panjang Pipa-Tekanan dengan insulator 0.075m

Tabel 2. Perbandingan Perhitungan Heat Losses

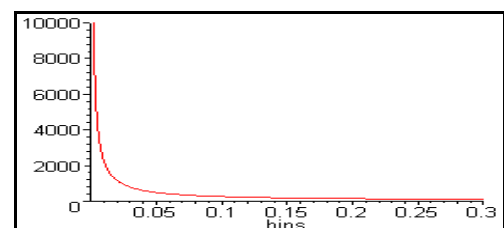
No.	Panjang Pipa (m)	Heat Losses (W/m)		
		tanpa insulator	insulator 0.075 m	insulator 0.1 m
1	1	375.9753	201.5897	173.7636
2	2	375.7966	201.4936	173.6807
3	3	375.6172	201.3970	173.5975
4	4	375.4370	201.3001	173.5139
5	5	375.2561	201.2027	173.4299
6	6	375.0745	201.1050	173.3456
7	7	374.8921	201.0069	173.2610
8	8	374.7089	200.9083	173.1760
9	9	374.5250	200.8094	173.0906
10	10	374.3403	200.7100	173.0049

Sehingga dapat dikatakan bahwa perubahan heat losses berbanding terbalik terhadap panjang pipa. Bentuk simulasi-nya dapat dilihat pada Gambar 5, 6 dan 7 menyerupai berupa garis lurus yang bergradien negatif. Namun yang cukup menarik adalah berpengaruhnya insulator yang cukup signifikan dalam mengurangi penurunan heat losses ini. Hal ini menunjukkan bahwa insulator bekerja dengan baik untuk mengurangi heat losses.

3.3. Analisis Heat Losses terhadap Ketebalan Insulator

Seperti yang sudah diketahui sebelumnya berdasarkan pengamatan persamaan *heat losses* (2.2), heat losses berbanding terbalik dengan ketebalan insulator. Hal ini diperkuat dengan simulasi pada Gambar 8.

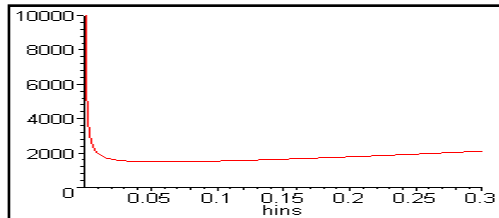
Terlihat bahwa semakin tebal insulator maka heat losses semakin kecil. Oleh karena itu akan dicari seberapa tebal insulator yang harus dipakai sehingga heat lossesnya seminimal mungkin. Akan tetapi perlu juga memperhitungkan seberapa besar biaya yang harus dikeluarkan berkenaan dengan pemakaian insulator tersebut. Pemilihan jenis insulator perlu diperhitungkan, karena biaya yang dikeluarkan diusahakan agar tidak terlalu besar. Sebagai langkah lebih lanjut akan dibahas pada simulasi model biaya berikut ini.



Gambar 8. Plot tebal insulator-heat losses

3.4. Analisis Model Biaya

Pada model biaya sudah diketahui sebelumnya berdasarkan biaya insulator yang ditentukan berdasarkan volume (ketebalan) insulator, maka diperkuat dengan simulasi pada Gambar 9.



Gambar 9. Plot tebal insulator-biaya

Pada Gambar 9 terlihat bahwa semakin tebal insulator maka biaya yang dikeluarkan semakin besar. Kemudian berdasarkan rumus diatas, dengan memberikan beberapa parameter yang dibutuhkan (terlampir) dan dengan menggunakan matlab 6.5, diperoleh tebal insulator yang optimal sebesar 5,733575488 cm dengan membutuhkan biaya sebesar \$1488,373278

4. PENUTUP

Berikut ini beberapa kesimpulan dan saran yang dapat disampaikan berkenaan mengenai masalah pada makalah ini.

1. Ketebalan insulator dapat mengurangi kehilangan panas secara baik.
2. Berdasarkan model yang diperoleh dapat dicari tebal insulator yang optimum sehingga biaya yang dikeluarkan minimum.
3. Masih terbuka penelitian lebih lanjut mengenai geothermal, hal ini disebabkan masih banyak fenomena yang terjadi di lapangan, seperti masalah kemiringan pipa.
4. Model yang diperoleh perlu diuji validitasnya lebih lanjut dengan data-data dari lapangan panas bumi

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ashat, A. (1997), *Pemuatan Simulator Perhitungan Kehilangan Tekanan Fluida Panas Bumi pada Pipa Alir*

Dua Fasa, Tugas Akhir Sarjana Teknik, Teknik Perminyakan, ITB,

- [2] Oppinet. Final Report 2nd year – 4 April 2003 : *Optimization on Gas and Oil Transmission and Distribution Pipeline Network*, KPP Matematika Terapan, ITB.
- [3] Saptadji N.M. (1997), *Perhitungan Tekanan, Temperatur dan Kualitas Uap di Pipa Alir Uap yang dilengkapi dengan Perangkat Pembuang Kondensat (Condensate Traps) Laboratorium Geothermal*, Jurusan Teknik Perminyakan, ITB.
- [4] Saptadji, N.M. (1997), *Teknik Panas Bumi. Departemen Teknik Perminyakan*, Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral, ITB.

LAMPIRAN

DAFTAR PARAMETER

Tekanan awal : 964 Kpa
 Laju alir massa : 46.3 kg/det
 Kekasaran pipa : 0.000045 m
 Diameter dalam pipa : 0.248 m
 Diameter luar pipa : 0.508 m
 Panjang pipa : 10 m
 Entalpi fluida : 1134 KJ/kg
 Suhu dalam pipa : 180⁰ C
 Suhu insulator : 60⁰ C
 Suhu luar pipa : 26⁰ C
 Konduktifitas thermal insulator : 0.074 W/m⁰C
 Harga pipa : \$ 0,7622/kg
 Harga uap : \$ 3.7 cent/KWh
 Harga Insulator (Calsium Silica) : \$ 800/m³
 Harga aluminium (tebal 3 mm) : \$ 30/m²
 Berat jenis pipa/besi : 0,78.10⁴ kg/m³

DAFTAR SIMBOL

f_M = faktor gesekan Moody
 d_1 = diameter dalam pipa (m)
 d_2 = diameter luar pipa (m)
 d_3 = diameter luar pipa dengan dilapisi insulator (m)
 h_{ins} = ketebalan insulator (m)

T_i = suhu dalam pipa ($^{\circ}\text{C}$)
 T_a = suhu luar pipa ($^{\circ}\text{C}$)
 T_w = suhu dinding luar pipa dalam insulator ($^{\circ}\text{C}$)
 L = panjang pipa (m)
 P = Tekanan (kPa)
 Q = heat loss (Watt)
 g = percepatan gravitasi (m/s^2)
 U_0 = koefisien transfer panas di sepanjang pipa ($\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 C_a = panas spesifik udara ($\text{W/kg}^{\circ}\text{C}$)
 ε = kekasaran pipa (m)
 h_0 = koefisien transfer panas di sisi luar pipa ($\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 k_1 = konduktifitas thermal insulator ($\text{W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

m_c = laju alir massa kondensate yang dihasilkan persatuan panjang (m/s)
 ρ_a = densitas udara (kg/m^3)
 μ_f = viscositas udara (kg/m.s)
 ρ_f = densitas cairan (kg/m^3)
 ρ_g = densitas gas (kg/m^3)
 Gr = Grazhot Number
 Pr = Prandtl Number
 Nu = Nuset Number
 N_{Re} = Reynold Number
 $\left(\frac{dP}{dL} \right)_{ges}$ = gradien tekanan gesekan (Pa/m)
